

石川県沿岸域における津波災害の軽減に向けて： 東北地方太平洋沖地震津波および日本海歴史津波の教訓と課題

由比政年^{1*}・煤田真也¹

2011年9月16日受付, Received 16 September 2011
2011年12月22日受理, Accepted 22 December 2011

Towards the Reduction of Tsunami Vulnerability along the Japan Sea Coast: Lessons Learned and Future Research Needs Deduced from the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami and Historical Tsunamis in the Japan Sea

Masatoshi YUHI^{1*} and Shinya UMEDA¹

Abstract

A magnitude 9.0 earthquake occurred on March 11, 2011, off the Pacific coast of the north-eastern part of Japan. This earthquake induced huge tsunamis that struck a broad range of coastal areas. Catastrophic damage occurred over hundreds of kilometers along the Pacific coast. In the first part of this paper, we review the physical characteristics and associated damage of the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami, on the basis of available records and field reports. The results of a tsunami trace survey conducted by a joint survey group are also described to highlight the serious damage that occurred near Sendai airport, Sendai-Shiogama port, Matsushima Bay, Ishinomaki Bay, and Oshika Peninsula in the Miyagi Prefecture. On the basis of insights obtained from the synthetic assessment of historical tsunamis, we then describe tsunami disaster risks to the Japan Sea coastal areas. The vulnerability against tsunamis in Ishikawa Prefecture, which is located in the middle-north of Japan, is estimated on the basis of available historical records and existing literature. We discuss future research that is required to improve the preparedness against tsunamis along the Japan Sea coasts.

Key Words: 2011 Tohoku Earthquake Tsunami, field survey, Japan Sea, Noto coast, Kaetsu coast
キーワード: 2011年東北地方太平洋沖地震津波, 現地調査, 日本海, 能登海岸, 加越海岸

1. はじめに

2011年3月11日に東北地方三陸海岸沖で発生したマグニチュード9.0の巨大地震は, 太平洋沿岸の広い範囲に甚大な被害を発生させた。震災発生後6ヶ月が経過した2011年9月10日までに確認された被害は, 死者15,781人, 行方不明者4,086人(警察庁, 2011)に達しており, その大部分は津波によるものと推定さ

れている。災害発生直後より, 多くの研究機関および行政機関による調査が精力的に実施され, 既に多くの観測結果および解析結果が報告されてきた(たとえば, Mori *et al.*, 2011; The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group, 2011; 高橋ほか, 2011; 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ, 2011; 土木学会水工学委員会, 2011; 土木学会東日本大震災特別委員会総合調査団, 2011; 日本情報地

¹ 金沢大学理工研究域環境デザイン学系 〒920-1192 金沢市角間町 (School of Environmental Design, College of Science and Engineering, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa, 920-1192 Japan)

*連絡著者 (Author for correspondence)

質学会, 2011 ; 日本地理学会, 2011)。大きな犠牲を伴って得られたこれら貴重な情報を有効活用し、津波災害に関する特徴を理解することを通じて、被災地のみならず国内外の各地域の防災力向上に役立てることはきわめて重要である。

将来に向けた地域津波防災を考える際には、津波の歴史的特性と地域的特性を理解することが基本となる。一般に、津波は、マグニチュード6.5以上の海底地震が海底から約80kmまでの深さで起きたときに発生が予想される（たとえば、合田, 1998）。海底地震の原因となる海底プレートや海域活断層の運動は、数十年から千年程度の長い周期で繰り返されるため、津波の発生も周期的な様相を呈する。この意味で、過去に観察された津波の歴史的特性を知ることが、将来の津波防災を考える上で有用である。また、津波は海上を伝播する過程および海岸付近を遡上する過程で地形による影響を強く受ける。このため、各地域の地形特性に応じた津波伝播の地域的特徴を合わせて理解しておくことも重要である。物理現象としての津波の普遍的特性を理解することに加え、その歴史的・地域的特性に関する知見を深めることが、津波研究および津波リテラシー教育を進める上で本質的に重要となる。

以上の点を踏まえて、本報の前半部分では、今回の巨大津波に関する包括的知見を整理するとともに、具体的被災事例を示すことで、津波に関する総合理解を深化させるための情報提示を試みる。まず、第Ⅱ章では、各種の文献調査に基づいて、2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震津波の特徴を抽出する。次いで、第Ⅲ章では、著者の一人（楳田）が参加した共同調査結果から対応する各種の被災例について述べる。続いて、後半部分では、石川県沿岸域に着目して、既往津波の歴史的・地域的特性について論じる。第Ⅳ章では、日本海域において過去に発生した津波、特に、石川県沿岸域に影響を与えた既往津波に焦点を絞り、その伝播特性や影響に関する文献調査を行って、特徴を総括する。最後に、第Ⅴ章では、以上の結果を踏まえて、今後の津波防災に資する技術情報を提示するためのツールの1つとして、数値シミュレーション技術に着目し、その活用の方方向性について議論を行う。

Ⅱ. 2011年東北地方太平洋沖地震津波の概要

東北地方太平洋沿岸は、明治三陸津波（1896年）、昭和三陸津波（1933年）、チリ地震津波（1960年）など、大規模な津波による被害を繰り返し被ってきた。これらの経験を踏まえて、当地域では、ハード・ソフトの両面において、津波防災への準備が国内外で最も広くかつ深く進められてきた。それにもかかわらず、今回来襲した津波はこれまでの備えを遥かに凌駕する規模で甚大な痕跡を残している。本章では、その特徴を各種研究機関の調査報告をもとに概観する。

1) 地震・津波の規模と被害の概要

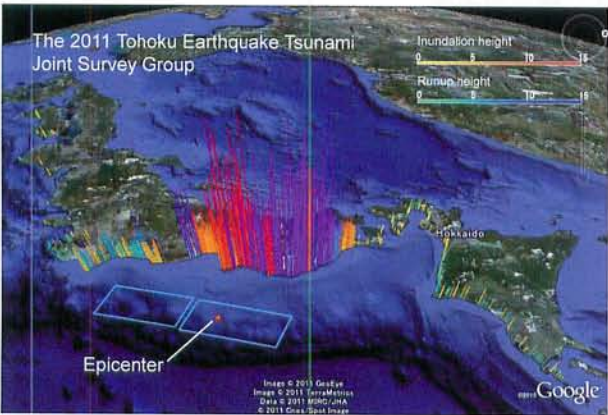
2011年3月11日、日本時間午後2時46分頃、東北地方太平洋沖でマグニチュード9.0の巨大海底地震が発生した。震源域は、三陸海岸沖130km（北緯38.1度、東経142.9度）深さ24kmに位置し、その大きさは、長さ約450km、幅約200kmと推定されている（気象庁, 2011）。この津波の第1波は、地震発生後約20分後に東北地方の沿岸に到達し、その後、太平洋沿岸約1,300kmに渡る広い範囲に來襲した。今回の災害で最も被害の大きかった岩手・宮城・福島 の三県にかけて、広い範囲で10mクラスの津波が来襲し、津波による浸水域は561km²に達した。警察庁（2011）の発表によると、震災発生後6ヶ月が経過した2011年9月10日現在で、死者は15,781人、行方不明者は4,086人に達している（表1）。特に、宮城、岩手両県における被害が顕著であり、人的被害（死者数プラス行方不明者数）の約90%がこの両県に集中している。このような甚大な人的被害および建物被害の大部分は、津波による犠牲と推定されている。

表1 被害状況の抜粋(2011年9月10日時点) (警察庁, 2011).
Table 1 Summary of Tsunami victims (10/Sep./2011).

地 域	人的被害		建物被害	
	死者数	行方不明者数	全壊	半壊
岩手県	4,656	1,692	20,199	4,483
宮城県	9,456	2,149	73,261	79,502
福島県	1,603	241	17,549	46,574
全 国	15,781	4,086	115,151	161,889

2) 波源近くでの初期波形の特徴

今回発生した津波の沖合における挙動が、国土交通省港湾局のGPS波浪計により観測されている（高橋ほか，2011）。その結果によると、たとえば、釜石港沖合18km、水深204m地点に位置するGPS波浪計で、6.7mもの津波が検知されている。通常、沖合での津波の波高は小さく、波長（周期）は非常に長いことから、外洋の大水深地点で津波を検知することは、技術的に困難とされてきた。この観測結果は、今回の津波が、これまでにわが国が経験してきた津波をはるかに上回る規模のものであったことを示している。また、東京大学地震研究所の海底水圧計（沖合約70km・水深1,600m、および、沖合約40km・水深1000mの2箇所）においても、津波波形が明瞭な形で観測されている（佐竹ほか，2011a）。沖合約70kmに設置された海底水圧計の観測結果は、水面が地震発生直後から徐々に上昇し（約2m）、その後、11分後にさらに急激に上昇する（さらに約3m）様子を示している。もう1つの水圧計およびGPS波浪計でも同様の波形が観測されている。こうした2段階の水位上昇のうち、最初のものは貞観地震（869年）に対して推定される波源域に、やや遅れた急激な水位上昇は明治三陸津波時（1896年）の波源域に対応すると指摘されている（佐竹ほか，2011a）。



(a) 遡上高・浸水高の調査結果
(青色系は遡上高，赤色系は浸水高を表す)。

図1 津波浸水高および遡上高の空間分布（東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ（<http://www.coastal.jp/ttjt/>）2011年9月9日参照）。

Fig. 1 Spatial distribution of inundation height and runup height of 2011 tsunami along the Pacific coast (<http://www.coastal.jp/ttjt/>).

3) 沿岸域における津波波高分布の特徴

沿岸域に近づくにつれ、津波は、浅水変形・屈折変形・V字型湾奥部へのエネルギー集中等によって波高を著しく増加させ、広い範囲で10mを超える巨大津波として多くの地点に來襲した。図1は、東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ（2011）による津波浸水高および遡上高の空間分布を示すものである。なお、ここでの浸水高および遡上高は、津波到達時の天文潮位を基準としたものである（図2）。緯度方向に投影した図中の青色の三角形は遡上高、赤色の丸は浸水高を表す。過去に発生した津波と比

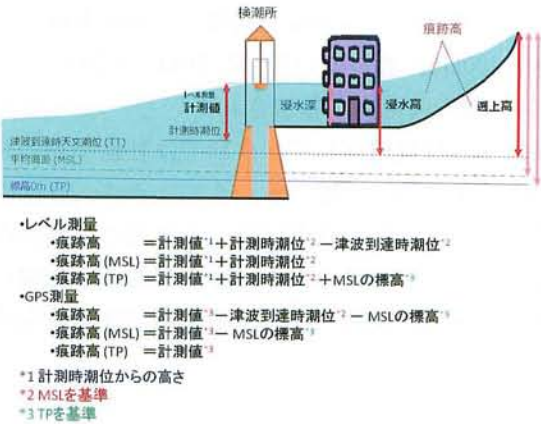
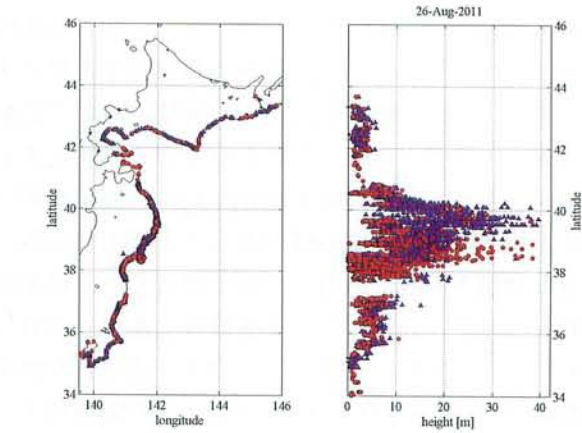


図2 津波高さの定義（東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ（<http://www.coastal.jp/ttjt/>））。

Fig. 2 Definition of inundation height and runup height (<http://www.coastal.jp/ttjt/>).



(b) 緯度方向への投影図
(青色の三角形は遡上高，赤色の丸は浸水高を表す)。

較して、今回の津波痕跡が最大となっている箇所が多い（佐藤，2011）。また、今回の津波波高分布の特性は、明治三陸津波および貞観津波を誘起した2つのタイプの地震が同時生起したとして説明できるとの指摘もある（佐竹ほか，2011a, 2011b；佐藤，2011）。

4）リアス式海岸における津波波高の増幅

三陸海岸のようなリアス式海岸部においては、V字型湾の湾奥や岬への津波の集中、湾内での多重反射による共振等によって津波が増幅しやすい。合同調査グループによる今回の観測においても、三陸海岸周辺では、南北290km程度に渡って痕跡高（浸水高および遡上高）が20mを超過し、30mを超える地域も約200kmに渡っている（森，2011）。局所的には、最高40.4mの遡上高が報告されている。なお、リアス式海岸部の被災例として、次章では牡鹿半島における調査結果について述べる。このように、今回の津波においてもリアス式海岸部での津波の増幅が顕著に認められ、痕跡高の大きさや空間的な分布幅は、過去に発生した明治三陸津波や昭和三陸津波を凌駕するものとなった。

5）平野部奥深くまでの津波の遡上氾濫

今回の観測では、仙台平野部においても、10m程度の津波痕跡高が観測され、内陸への浸水範囲は、数kmにも渡っている（東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ，2011；日本情報地質学会，2011；日本地理学会，2011など）。一例として、仙台空港付近の被災の様子について、次章で調査結果を報告する。このように平野部においても陸域に向けて長距離の遡上・氾濫が発生したことは今回の津波災害で特徴的であり、今後、低平地部における避難計画のあり方や二線堤の整備の進め方などを議論する際に十分な考慮が必要である。今回の津波では、遡上氾濫時の津波の流速が、ビデオ画像等に基づいて解析されている（越村，2011）。その結果、波速と同程度の数m/sの流速が推算されており、「長時間持続する速い流れ」としての津波の特性を考慮することの重要性も指摘されている（都司，2011）。

6）津波の河川遡上

津波の河川遡上に関する事例も多数報告されている（土木学会水工学委員会，2011）。多くの河川にお

いて、河道内での遡上距離は、堤内地と比較して二倍程度に及んでいる。たとえば、宮城県北上川において、約50kmの遡上が確認された。また、津波の伝播速度に関しても、河道内の波速は、堤内地の二倍程度に達している。河川堤防の破堤や越流による氾濫、水門等の河川構造物の被災も随所に見られる。大規模な破堤被害は、二級河川規模の河川で多く観察されている（田中ほか，2011）。

7）港湾・船舶関連の被害

港湾域においても、多様な津波被害が報告されている（高橋ほか，2011）。釜石湾や大船渡湾においては、これまでに、津波低減のための世界最大級の湾口防波堤（津波防波堤）が建設されてきた。これらの大規模な構造物は、津波の波高を60%低減させ、津波の氾濫を数分程度遅らせる機能を発揮したが、津波を完全に防ぐには至らず、湾口防波堤自身も防波堤前後の水位差に起因する水平力などによって滑動・水没した。また、今回、多くの漁港において、港内に停泊していた船舶が津波に押し流され、建物に衝突してその被害を助長するケースが報告されている（高橋ほか，2011）。港湾域の被災例として、次章では、仙台塩釜港や石巻港における被害について解説を加える。船舶や家屋等の漂流物が遡上津波による被害を著しく拡大させたことも今回の津波の特徴の1つである。

8）構造物被害

構造物については、10m級の津波が来襲した地域で、木造家屋が壊滅的な破壊・流失被害を受けている。従来、木造家屋は浸水深が2mを超過すると全壊に至ると考えられており、その基準を裏付ける結果となった。一方、これまで、津波に対する強度が優れていると言われていた鉄筋コンクリート造の建物についても、転倒・移動した例や基礎の洗掘により傾斜した例が報告されている（建築研究所・国土技術政策総合研究所，2011）。ただし、高層の鉄筋コンクリート構造物等で津波避難ビルに指定されていたものに関しては、2階、3階程度まで浸水を受けつつも津波による流体力に抵抗し、鉛直避難場所としての機能したものも多い（中央防災会議，2011）。

9) 津波からの避難

今回来襲した津波は、従来整備されてきた堤防・防波堤等のハード施設の機能を遥かに凌駕するものであり、津波からの早期避難、特に、鉛直避難の重要性があらためて認識される結果となった。避難の遅れにより多くの人々が犠牲になった一方、日頃からの津波防災教育が効果を発揮し、的確な避難行動により被害を軽減させた例も報告されている(片田, 2011)。

Ⅲ. 宮城県における津波被害の現地調査

1) 合同調査チームによる津波調査の概要

今回の津波被害については、これまでに行われたことのない大規模な合同調査が実施された(東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ, 2011)。合同調査グループには、海岸工学、津波工学および地球物理学などの研究者や民間企業、行政などからの実務者が多数参加し、東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループとして北海道から沖縄に至る広域的な津波痕跡の調査が行われた。著者の一人も第2期調査団に参加し、2011年3月31日から4月5日に仙台湾から牡鹿半島にかけての津波氾濫地域において、津波痕跡高の測量と被害状況の現地調査を行った(榊山ほか, 2011)。以下では、その調査結果に基づいて、宮城県中・南部における津波被害の特徴を述べる。



図3 現地調査地域。

Fig. 3 Tsunami trace survey area.

2) 仙台湾における津波被害

仙台市、名取市、岩沼市辺りの海岸線は単調な砂浜が続いており、陸側には仙台北部の低平地が広がる。津波による浸水域は海岸線から4-5km程度内陸まで帯状に広がり、河川ではさらに数km上流まで達した。海岸から約1km内陸にある仙台空港では、浸水深は3mを超え、瓦礫や土砂が建物1階や敷地に広く堆積し、国内線の臨時便の復旧までに約1ヶ月を要した。

空港東側の海岸付近の被害状況を図4と5に示す。この付近では津波は約6mの高さの海岸堤防を乗り越えて陸域に浸入している。堤防背後の地面は岸沖方向に10m程度が顕著に洗掘され、堤防は裏法を中心に崩壊している。堤防背後にある海岸砂丘には松林が岸沖方向に約100~200mの幅で分布していたが、堤防寄りにあった松は図5のように折れたり、なぎ倒されたりしたものが多く、陸寄りの砂丘頂部付近では傾いた状態のものが目立った。松林背後に広がる宅地や農地も津波氾濫流に飲み込まれ、家屋や車などが大量に押し流されていた。大部分の家屋は1階が完全に水没する程度まで浸水し、基礎を残して建物全体が流失していたが、1階の損傷度合は大きいものの2階はある程度元型を留めることができた家屋も一部見られた。家屋の損傷度合は同一集落でも差が大きく、建物や道路の配置、家屋の形状や強度、微地形などの要素が影響したものと考えられる。海岸線から数km内陸にある仙台東部道路の盛土は津波氾濫流や漂流物のある程度堰き止め、浸水域の拡大を抑える働きが見られた。

仙台湾の北端に位置する仙台塩釜港周辺においては、工場や倉庫等の大型の建物の損壊および大型運搬車両や資材等の漂流被害が目立った。高砂埠頭のコンテナターミナルに隣接する建物で浸水深は2.6m、浸水高は6.8mであった。周辺では大量のコンテナが津波によって押し流され、図6に示すように散乱していた。また、引き波時に港外に漂流し、周辺の海岸に打ち上げられたと見られるコンテナも多数あった。

図7はターミナル南東側の護岸の被害状況を示すものである。高さ3.7m、幅1.6m、長さ5mのパラペットが押し倒され、さらに波消ブロックが多数乗り越上げている。被災前の波消工の幅は水面より上の部分で15m程度ある。東西方向に伸びる長さ約250mの護



図4 仙台空港東側の海岸堤防の被害.

Fig. 4 Damage of coastal dikes at the east coast of Sendai airport.



図5 堤防背後の松林の被害.

Fig. 5 Damage of pine trees behind the coastal dikes.



図6 仙台塩釜港高砂埠頭におけるコンテナの被害.

Fig. 6 Damage of containers at Takasago wharf of Sendai-Shiogama port.



図7 高砂埠頭コンテナターミナル南東側の護岸の被害.

Fig. 7 Damage of seawalls in the South-east area of the container terminal at Takasago Wharf.

岸では半数程度のパラペットが元の位置から数m～10m近く陸側へ移動した。一方、その東端から北東方向に伸びる護岸は無事であった。周辺で計測された浸水高から、津波はこの護岸も越波したと推測される。無事であった護岸のパラペットは図7のものより断面積が2倍以上大きい。また、その波消工の前面には、離岸堤として当初建設されたと思われる波消ブロック群が隣接し、消波工の実質的な幅も倒壊したものに比べて2倍以上広い。そのため、この護岸の安全率にかなり余裕があり、今回の非常に大きな津波に耐えることができたと考えられる。

3) 松島湾における津波被害

松島湾は仙台平野と石巻平野の間に位置し、非常に入り組んだ複雑な海岸線を持つ。沿岸域まで丘陵が迫り、低平地は限られるため、津波による浸水域は比較的狭い。津波の浸水高は南西側の湾口付近にある七ヶ浜町花瀬浜漁港（図8）で6.8m、北東側の湾口付近の東松島市宮戸島月浜（図9）で8.8mに対

して、湾奥の中央部の松島町瑞巖寺や磯崎漁港で2.5mと比較的低く、湾奥の西側にある塩釜港や塩釜市街地で4～5m程度であった。津波の高さは湾奥部（特に中央部から東側）で低減している。松島湾は湾口や湾内に非常に多くの小島があり、湾口の幅に比べて湾奥の幅が広く、湾内の水深も大きくない等により、津波の高さが湾内で抑えられたと推測される。図10は湾奥部に位置する遊覧船乗り場の被災後の様子である。津波は護岸を越流し、周辺の浸水深は1～1.5m程度であった。この周辺は宮城県中・南部の海岸沿いで人や建物の被害が最も小さく抑えられた地域の1つであり、復旧作業も比較的早く進んでいるようであった。ただし、湾内にあった牡蠣養殖などの水産施設のダメージは大きいようである。

4) 石巻湾における津波被害

石巻湾は宮戸島と牡鹿半島に挟まれ、西側の海岸線は単調な砂浜海岸、東側は石巻港や石巻漁港で占められているが、砂浜海岸も一部残っている。津波



図8 花渚浜漁港の建物の被害。

Fig. 8 Damage of a harbor building at Hanabuchi-hama fishing harbor.



図9 宮戸島月浜地区の被害。

Fig. 9 Damage to the houses at Tsukihama, Miyatojima island.



図10 瑞厳寺付近の遊覧船乗り場の被災後の様子。

Fig. 10 Damage around an excursion boat wharf near Zuiganji temple.



図11 東松島市野蒜の松島自然の家の被害。

Fig. 11 Damage of Matsushima gymnasium at Nobiru, Higashimatsushima City.



図12 東松島市東名地区の被害。

Fig. 12 Damage at Tona area, Higashimatsushima City.

は海岸堤防や港の護岸を乗り越えて、沿岸部の低平地にあった市街地、集落、学校、工場や農地等を襲い、火災も誘発されたため、非常に多くの人命が失われた地域である。浸水域は海岸から3～4km、河川部はさらに数km上流にまで及んでいる。

石巻湾の西端に位置する東松島市野蒜や東名地区における被害を図11と図12に示す。海岸堤防から約200mの所にある松島自然の家の体育館周辺では、津

波氾濫流による樹木や電柱の倒壊および地面の洗掘が顕著である。付近の海岸堤防は決壊している。図11より、芝の地面が洗われ、地中にあった石や樹木の根が剥き出しになっている様子が分かり、この付近の氾濫流の流速は大きかったと見られる。また、建物基礎の隅角部では2mに達する洗掘孔が形成されていた。体育館の浸水高は8.7m、浸水深は4m程度であった。ここから東松島市東名地区の間は、図12に示すように低地の浸水被害が著しい。海岸堤防の決壊と地震による地盤沈下が重なり、氾濫水が海に戻らず、広範囲で冠水状態が続いていた。また、石巻港西側の定川河口右岸の水田や石巻市南浜町の海岸付近の宅地でも湛水していた。

石巻港や石巻漁港の様子を図13と図14に示す。岸壁には大きな損傷は見られず、荷揚げ場の舗装が所々損傷し、舗装が剥がれた箇所地面が陥没していた。この付近の浸水高は5m程度あり、貨物船が中央埠頭に乗り上げていた。港の倉庫はシャッターの損傷が激しいものの、鉄の骨組みは耐えている。石



図13 石巻港大手埠頭の被害。

Fig. 13 Damage at Oote wharf of Ishinomaki port.



図14 石巻漁港の漁船の被害。

Fig. 14 Damage of a fishing vessel at Ishinomaki fishing port.



図15 石巻漁港周辺の工場地域の被害。

Fig. 15 Damage at the manufacturing quarter near Ishinomaki fishing port.



図16 牡鹿半島桃浦地区の港の被害。

Fig. 16 Damage of a harbor at Momonoura hamlet of Oshika Peninsula.

巻漁港付近の浸水高は6m程度あり、図14のように漁船が打ち揚げられた。打ち揚げられた漁船や貨物船の錨は海中にあり、岸壁付近に留まっていた。両港周辺には飼料、肥料および食品関係等の工場が多くあり、図15に示すように各工場で使用されていたと見られる円筒形のタンクが津波氾濫流によって押し流され、漂流した。多くは押し波時に陸側へ運ばれ、建物や樹木等に衝突して止まったようであるが、一部には津波の引き波時に海側へ運ばれたものもあり、漁港の防波堤に乗り上げたタンクもあった。港の周辺は工場が隣接し、運搬車両、工場の付帯施設や材木等が流され、漂流物が大量に発生した。その一部は周辺の商業地や宅地まで運ばれ、漂流物による被害も見られたが、敷地を囲うフェンスや樹木および街路樹が漂流物を捕捉している箇所も多数見られた(図15)。

5) 牡鹿半島における津波被害

三陸海岸の南端に位置する牡鹿半島には、リアス

式海岸が続いている。入江に面した限られた低地に集落があるため、集落の大部分が津波に飲み込まれ、甚大な被害を受けた地域である。半島は震央に近く、地震による地盤変動量が大きい。半島先端部では1.2m沈下したことが国土地理院(2011)によって報告されている。

図16は石巻湾に面する半島西側に位置する桃浦地区の漁港を撮影したもので、岸壁付近は海水面下に没していることが分かる。目立った損傷も無く一様に沈んでいることから、地盤沈下の影響であると見られる。地盤沈下の影響は水際部で顕著に現れる。桃浦地区の最も山側に位置する小学校のグラウンド(海岸線から約400m程度)で浸水深は0.5m程度、浸水高は11mであった。この値は石巻湾に沿った地域の中では高い値である。

半島の先端付近に位置する鮎川地区での浸水高は8～8.5mであった。港の損壊や主に周辺低地の家屋の流失や倒壊などの大きな被害を受けたものの、局地的に浸水高が高まることなく、被害度合いも半島



図17 牡鹿半島大谷川浜地区の被害.

Fig. 17 Damage at Ooyagawahama hamlet of Oshika Peninsula.



図18 牡鹿半島谷川浜地区の被害.

Fig. 18 Damage at Yagawahama hamlet of Oshika Peninsula.

のその他の地区と同程度であった。半島の東側に位置する鮫浦湾に面した大谷川浜地区では、遡上高が約21mに達した。この地区と隣接する谷川地区の被害状況を図17と図18に示す。両地区では水産施設、家屋、農地および道路まで津波に押し流され、壊滅的な被害を受けている。大谷川地区では最も山際に立つ民家1軒のみが残り、道路や農地は浸食または土砂に埋もれ、荒地と化した(図17)。海岸堤防は崩壊し、堤防背後の地盤も深く洗掘され、津波による地盤浸食によって地形が変化した。また、杭基礎から離脱し、山手側へ運ばれたと推測される鉄筋コンクリートの建物(図18)もあった。牡鹿半島の東側の付け根に位置する女川町でも、鉄筋コンクリートや鉄骨造の比較的強固な建物の倒壊が報告されており(柿沼ほか, 2011)、半島東側の湾奥に位置する地区においては、津波氾濫流が集中的に作用して激しい破壊を受けた地点が目立った。

IV. 石川県沿岸域における津波伝播の特性

1) 日本海における既往津波とその特性

日本海において過去に発生した津波の記録として、羽鳥・片山(1977)は、22個の津波を取り上げて総括している。ただし、17世紀以前の津波に関しては、記録も少なく、津波規模や波源域の特定が困難なものも含まれている。北陸電力(2010)、北國新聞社(2011)にも同様の一覧表が掲載されている。日本海側の津波で最も年代の古い記録は、701年(大宝元年)に若狭湾で発生したと推定される津波である(詳細は不明)。これ以前の資料は報告されていないため、現状では、日本海側における古津波の記録から千年

程度の時間スケールで周期性を論じることは不可能である。以下では記録の信頼性が高いと考えられる18世紀以降に発生した津波を対象とする。羽鳥・片山(1977)によると、日本海側において、比較的大きな津波が、18世紀に5回、19世紀に6回発生している。20世紀には、1980年代以降に発生した、日本海中部地震津波(1983年)および北海道南西沖地震津波(1993年)を加えると8個の津波が観測されている。波源域の分布を見ると、山陰地域では少なく、能登半島以北に多く現れている。特に、日本海東縁部の北海道西方沖から新潟県西方沖に規模の大きい津波の波源域が集中している。この領域は、北米プレートとユーラシアプレートの境界部分に相当するが、太平洋側のものとは異なり、プレート境界は不明瞭と考えられている(土木学会原子力土木委員会, 2002)。地震規模が最大のものは、1993年の北海道南西沖地震で、マグニチュード7.8、次いで、1983年の日本海中部地震のマグニチュード7.7が続いている。

2) 日本列島・大陸間の津波の多重反射

日本海は、日本列島とユーラシア大陸によって囲まれた縁海であり、半閉鎖性の海域として位置づけられる。このため、日本海域で発生した津波は、大陸からの反射波の影響を強く受ける。羽鳥(1986)は、1983年に日本海東縁部で発生した日本海中部地震津波を対象に津波伝播図を用いた波浪伝播解析を行い、大陸からの反射波が日本海沿岸に到達するまでの時間を推定した。解析結果は、日本海沿岸各地での験潮記録と良く整合するものであった。例として、ロシア沿海州で反射した津波は、地震発生から約2時間50分後、北朝鮮からの反射波は約3時間20分

後、韓国からの反射波は約3時間50分後にそれぞれ能登半島に到達すると推定されている。この例が示すように、日本海で発生した津波については、波源から直接伝播する津波に加えて、地震発生から2～4時間後に来襲する大陸からの反射波の動向にも注目する必要がある。実際に、日本海中部地震の際には、津波が日本海沿岸で多重反射を繰り返し、一日以上減衰せずに沿岸各地に來襲した（河田，2010）。このような多重反射の影響により、日本海を波源とする津波の継続時間は太平洋側と比較して長いものとなるが、どの程度の高さの津波がいつまで継続して來襲するかを予測することは現在の解析技術をもってしても困難である（河田，2010）。

3）石川県沿岸域に來襲した既往津波と被害の概要

日本海で発生した津波のうち、石川県沿岸に影響を及ぼしたと考えられるものを表2にまとめておく（羽鳥，1999に基づく）。なお、この表には、石川県

表2 石川県沿岸域に影響を及ぼした既往津波および地震の一覧（羽鳥（1999）に加筆）。

Table 2 List of historical tsunamis related to Ishikawa Prefecture, Japan (reproduced from Hatori, 1999).

発生年月日	震源位置	マグニチュード	石川県での津波波高・津波被害
1614/11/26	新潟県西方沖	7.7	
1729/08/01	能登半島北方沖	6.6-7.0	
1741/08/28	北海道渡島西方沖	?	（輪島市門前町3-4m）
1762/10/31	新潟県北方沖	7.2	
1799/06/29	石川県金沢近海	6	（金沢市金石3-4m）
1802/12/09	新潟県佐渡島西方	7.2	
1833/12/07	山形県西方沖	7.5	（輪島市5.7m）
1892/12/09	石川県羽咋市沖	6.4	（異常潮位を観測）
1896/04/02	石川県珠洲市沖	5.7	
1933/09/21	石川県七尾湾	6	
1940/08/02	北海道積丹半島沖	7.5	（輪島市0.4m）
1952/03/07	石川県大聖寺沖	6.5	
1964/06/16	新潟県沖	7.5	輪島市2.1m 穴水湾で冠水
1983/05/26	日本海中部 （秋田・青森県沖）	7.7	珠洲市狼煙漁港2.5m 輪島市輪島港1.5m 志賀町福浦漁港1.8m 負傷者・住居被害有
1993/02/07	石川県能登半島沖	6.6	輪島市0.5m
1993/12/12	北海道南西沖	7.8	珠洲市木ノ浦2.9m 輪島市輪島港2.0m 輪島市鶴入港3.5m 船舶被害24隻

沿岸域において発生した地震も併記している。まず、驗潮所での津波観測が開始される以前の津波について概観すると、石川県内で最も大きな津波波高を示している既往津波は、1833年（天保4年）に山形県沖で発生した、マグニチュード7.5の地震によるものである。このときの輪島での波高は5.7mに達したと推定されており（渡辺，1998），輪島での死者は47名，流失全壊家屋数は318戸にのぼったとされる（東京大学地震研究所，1984）。1741年（寛保1年）の北海道渡島西方沖津波では，能登半島北西部の輪島市門前町において被害があり，波高は3～4mに達したと推定されている（羽鳥，1984）。1799年（寛政11年）の加賀地震の際には，津波が金沢市金石地区に襲来し，数百戸をかきさらひ，溺死者多数と記録されている。この時の波高は3～4mに達したと推定されているが（羽鳥・片山，1977），波源や浸水域等の詳細は明らかにされていない。他にも，規模の小さな津波の観測例として，1892年に羽咋市で観測された異常潮位も紹介されている（羽鳥・片山，1977）。

近年では，1964年の新潟県沖の地震津波で，穴水湾を中心に床上浸水（4戸），床下浸水（131戸），田畑冠水の被害が生じている。また，1983年の日本海中部地震津波の際には，津波による負傷者（8名），住家破損（2軒），床上浸水（3戸），床下浸水（3戸）の被害が発生した（石川県防災会議，2010）。この時の石川県沿岸における津波痕跡高は，珠洲市狼煙漁港で2.5m，輪島港で1.5m，志賀町福浦漁港で1.8mとなっている（東北大学工学部津波防災実験所，1984）。1993年の北海道南西沖地震津波では，石川県内で24隻の船舶被害が生じた。このときの津波痕跡高は，珠洲市木ノ浦で2.9m，輪島市輪島港で2.0m，同鶴入港で3.5m，志賀町福浦漁港で1.98mとなっている（首藤ら，1997）。

4）能登半島外浦海岸における津波の増幅

石川県沿岸域に來襲した津波の特性として，最も特徴的な点は，日本海東縁部から伝播した津波が，能登半島外浦海岸で大きく増幅することである。能登半島北方沖合には，周囲と比較して水深の浅い海底地形が広がっている。津波の波速は水深に依存し，浅いところでは進行が遅くなることから，このような場所では波向きの変化が生じる。日本海東縁部に発した津波は，この半島北部に広がる浅海域で屈折

し、能登半島外浦側の沿岸域に集中する(羽鳥, 1999)。波源の位置が多少変わってもこの傾向は共通である。このように能登半島外浦海岸(輪島市、珠洲市)においては、沖合海底地形の有するレンズ効果により、津波が屈折・集中し、波高増幅が顕著となることに留意が必要である。また、能登半島においては、湾の入り口に比較して湾奥幅が狭くなっている箇所も多く、そのような地点では津波のエネルギー集中が起こって波高が局所的にさらに増幅される。なお、日本海東縁部で発生した津波の場合、輪島への伝播時間は1時間強程度である。最大波と初動との時間差は小さく、1, 2波目で最大波高となる(羽鳥, 1999)。

5) 七尾湾内における多重反射

合わせて留意すべき点として、七尾湾内における津波の多重反射をあげることができる。この点について、羽鳥(1999)は、以下のように論じている。富山湾には、水深が1,000m程度に達するような深い海底谷が入り込んでいるため、富山湾に侵入した津波は、広域に拡散する傾向にある。このため、津波波源域から能登半島内浦側に直接到達する津波波高は、比較的小さい(ただし、リアス式海岸の湾奥部では注意が必要)。一方、七尾湾においては、1964年の新潟地震津波の際に、津波波高が1.0~1.5mに達し、家屋への浸水被害が生じた(Iida, 1967)。この津波の周期は約20分であり、湾内あるいは陸棚での共振(セイシュ)などによって増幅されたことが示唆される。新潟地震津波および日本海中部地震津波の際に、七尾湾では、第一波の到達後、それぞれ、約4時間後、約7時間後に最大波高が観測されている(羽鳥, 1999)。このように初期波の到達からかなり時間を経過した後に波高が増幅される点について留意が必要である。

V. おわりに

今回の津波災害を受けて、我が国では、二重・三重の防護施設整備や、適切な避難行動を実現するためのソフト対策の重要性が広く認識されるに至っている。前者の例としては、道路等を盛土構造として二線堤としての機能を持たせる多重防護への転換が図られているし、後者についても全国の自治体で防災計画の見直しやハザードマップの整備拡充が進め

られている。日本海側の津波のような低頻度災害を考えるにあたっては、国内外の各地で発生した津波の物理的特性や人的・物的被害の特徴について普遍的知見を深め、かつ、地域の歴史や特性を理解することで、その知見の有効活用を図る姿勢が必要である。引き続き、過去の事例研究を深め、将来予測や対策に活かすための研究・教育活動を並行して進めていくことが研究教育機関に期待される。

津波防災教育・津波防災研究・津波基礎研究の3者を有機的に連携させる上で、津波の物理的挙動を解明・予測することが必要になるが、そのためには、数値シミュレーションの活用が有効である(たとえば、首藤, 1989; 高橋, 2004)。以下では、この数値シミュレーション活用の方向性について、①近地津波特性の推定、および、②流れとしての特性の解明の二つの視点を提示したい。

まず、石川県の地域・歴史特性に着目した視点から、近地津波への適用について述べる。石川県沿岸に襲撃する津波に関して、これまでに、古村ら(1995)、北陸電力(2010)、石川県(2011)等によって解析が実施されてきた。現在、石川県においてさらに包括的な解析を実施することが検討されている。これらの解析は、日本海東縁部や佐渡西方など震源が比較的遠方に位置し、第1波が到達するまでに1時間以上要するような津波、言い換えると、避難に一定の時間を確保できる津波を主な対象としている。古村ら(1995)は、能登半島沖に震源を有する津波を模擬した解析を実施しているが、この種の近地津波についても、今後、より包括的な検討を実施する価値があろう。たとえば、北陸電力(2010)によると、能登半島周辺の西方および北方の海域には、計12個の活断層が想定される。こうした活断層が震源となって津波が発生した場合、金沢市周辺には短時間での津波到達が予想される。適切な避難行動の選択は、津波の到達時間にも大きく左右されるため、低頻度ではあっても、たとえば、1799年に金沢市金石地区に被害を及ぼしたような近地津波が起こりうると想定して、その特性を予測し、的確な避難行動の準備を進めておく必要がある。

次に、津波の流れとしての特性に着目した解析の視点について述べる。大津波の場合、陸域への氾濫水の流速は秒速10m前後に到達することも考えられ、その状態が数分から数十分間継続する。今回の津波

に際しても、高速流れを考慮することの重要性が指摘されている（都司，2011）が，従来の津波シミュレーションは，もっぱら波としての特性に焦点が当てられてきた。一方，たとえば，砂丘あるいは堤防を越流した津波，あるいは，建物の周辺で急激な縮流と拡幅を受けるような条件下では，射流と称される高速流れから常流と称される比較的緩やかな流れに急激に遷移する複雑な流れ場が形成される場合もある。従来の解析法では再現精度に難のある，このような複雑な流れ場についても，先端的な数値解析技術（たとえば，Liang, 2010）を適用することで，その特性を解明していく努力が必要とされよう。こうした「流れ」としての津波の特性について詳細を明らかにし，周知徹底を図ることも津波リテラシーの醸成を図る上で重要である。

謝 辞：津波現地調査では，電力中央研究所の榊山勉上席研究員，吉井匠主任研究員，筑波大学の庄司学准教授に同行させて頂き，貴重なご意見を賜った。ここに記して謝意を表します。

文 献

- 中央防災会議，2011年9月10日参照：津波避難ビル等について．東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会資料，<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/higashinihon/7/4.pdf>
- 土木学会原子力土木委員会，2002：原子力発電所の津波評価技術本編．318p.
- 土木学会東日本大震災特別委員会総合調査団（地震工学委員会），2011年9月10日参照：緊急地震被害調査報告書．<http://committees.jsce.or.jp/report/taxonomy/term/25>
- 土木学会水工学委員会，2011年9月10日参照：土木学会水工学委員会東北関東大震災調査団調査報告書．<http://rde.nhdr.niigata-u.ac.jp/jsce/>
- 合田良實，1998：海岸・港湾（二訂版）．彰国社，東京，321p.
- 羽鳥徳太郎，1984：日本海の歴史津波．月刊海洋科学，**16**，538-545.
- 羽鳥徳太郎，1986：日本海津波における大陸からの反射波．地震研究所彙報，**61**，329-338.
- 羽鳥徳太郎，1999：能登半島における津波の屈折効果．地震第2輯，**52**，43-50.
- 羽鳥徳太郎・片山通子，1977：日本海沿岸における歴史津波の挙動とその波源域．地震研究所彙報，**52**，49-70.
- 北國新聞社，2011：図解 北陸の地震・津波・原発．北國新聞社，金沢，93p.
- 北陸電力株式会社，2010：志賀原子力発電所1号機「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の改定に伴う耐震安全性評価結果報告書，第10章，地震随伴事象に対する考慮（津波に対する安全性），10_1-10_62.
- 古村貴男・北浦 勝・宮島昌克・池本敏和・藤野崇之，1995：北陸に震源を有する能登の津波被害予測とその防災対策に関する研究．土木学会中部支部研究発表会講演概要集，89-90.
- Iida, K., 1967: The Niigata Tsunami of June 16, 1984, The General Report on the Niigata Earthquake of 1964. *Tokyo Electrical Engineering College Press*, Tokyo, 97-127.
- 石川県防災会議，2010：石川県地域防災計画（震災対策編），第1章，1-61.
- 石川県ホームページ，2011年9月10日参照：石川県津波浸水想定区域図．http://www.pref.ishikawa.lg.jp/bousai/bousai_g/tsunami/tsunami_map/
- 柿沼太郎・辻本剛三・安田誠宏・玉田崇，2011：宮城県北部における津波痕跡調査．東北地方太平洋沖地震津波に関する合同調査報告会予稿集，19-29.
- 片田敏孝，2011：釜石市における津波防災教育一市内小中学校の子供たちを救う一．土木学会誌，**96**(8)，23-28.
- 河田恵昭，2010：津波災害一減災害社会を築く．岩波新書，岩波書店，東京，191p.
- 警察庁ホームページ，2011年9月10日参照：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震の被害状況と警察措置．<http://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/index.htm>
- 建築研究所・国土技術政策総合研究所，2011年9月10日参照：建築物の津波被害の概要について．国土技術政策総合研究所ホームページ．<http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/saigai/h23tohoku/houkoku/happyou/2-11.pdf>
- 気象庁，2011年3月25日：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震について（第28報）．気象庁報道発表資料．
- 国土地理院，2011年11月14日参照：GPS連続観測から得られた電子基準点の地殻変動．国土地理院ホームページ．<http://www.gsi.go.jp/index.html>
- 越村俊一，2011：東北地方における津波浸水範囲および津波被害の調査．東北地方太平洋沖地震津波に関する合同調査報告会予稿集，34-37.
- Lian, Q., 2010: Flood simulation using a well-balanced shallow

- flow model. *Journal of Hydraulic Engineering*, **136**, 669-675.
- 森 信人, 2011: 津波合同調査の全体概要とその解析結果. 東北地方太平洋沖地震津波に関する合同調査報告会予稿集, 1-6.
- Mori, N., Takahashi, T., Yasuda, T. and Yanagisawa, H., 2011: Survey of 2011 Tohoku earthquake tsunami inundation and run-up. *Geophysical Research Letters*, **38**, L00G14, doi: 10.1029/2011GL049210
- 日本地理学会, 2011年9月10日参照: 東北地方太平洋沖地震・日本地理学会災害対応本部 津波被災マップ(電子国土版), <http://danso.env.nagoya-u.ac.jp/20110311/data/index.html>
- 日本情報地質学会ホームページ, 2011年9月10日参照: 東日本大震災津波被害現地調査報告. <http://www.jsgi-map.org/tsunami/>
- 榊山 勉・吉井 匠・庄司 学・榎田真也, 2011: 電中研チームによる津波被害調査報告. 東北地方太平洋沖地震津波に関する合同調査報告会予稿集, 77-82.
- 佐竹健治・酒井慎一・篠原雅尚・金沢敏彦・藤井雄士郎, 2011a: 津波波形からみた東北地方太平洋沖地震の津波波源. 東北地方太平洋沖地震津波に関する合同調査報告会予稿集, 67-68.
- 佐竹健治・酒井慎一・藤井雄士郎・篠原雅尚・金沢敏彦, 2011b: 東北地方太平洋沖地震の津波波源. *科学*, **81**, 407-410.
- 佐藤慎司, 2011: 構造物による津波防護機能とその限界. 東北地方太平洋沖地震津波に関する合同調査報告会予稿集, 50-56.
- 首藤伸夫, 1989: 津波の数値計算. *土木学会論文集*, 411 (II-12), 13-23.
- 首藤伸夫・明田定満・都司嘉宣・松富英夫, 1997: 1993年北海道南西沖地震侵害調査報告 第4章 津波. *土木学会*, 76-106.
- 高橋重雄・戸田和彦・菊池喜昭・菅野高弘・栗山善昭・山崎浩之・長尾 毅・下迫健一郎・根木貴史・菅野甚活・富田孝史・河合弘泰・中川康之・野津 厚・岡本 修・鈴木高二朗・森川嘉之・有川太郎・岩波光保・水谷崇亮・小濱英司・山路徹・熊谷兼太郎・辰巳大介・鷺崎 誠・泉山拓也・関 克己・廉 慶善・竹信正寛・加島寛章・伴野雅之・福永勇介・作中淳一郎・渡邊祐二, 2011: 2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報. 港湾空港技術研究所資料No.1231, 200p.
- 高橋智幸, 2004: 津波防災における数値計算の利用. *日本流体力学会数値流体力学部門Web会誌*, **12** (2), 23-32.
- 田中 仁・真野 明・慮 敏, 2011: 津波の河川遡上. 東北地方太平洋沖地震津波に関する合同調査報告会予稿集, 38-43.
- The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group, 2011: Nationwide Field Survey of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami. *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, **B2**, 67, 63-66.
- 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ, 2011: 東北地方太平洋沖地震津波に関する合同調査報告会予稿集, 103p.
- 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループホームページ, 2011年9月10日参照. <http://www.coastal.jp/ttjt/>
- 東北大学工学部津波防災実験所, 1984: 昭和58年5月26日日本海中部地震津波に関する論文及び調査報告. 東北大学工学部津波防災実験所研究報告, 第1号, 267p.
- 東京大学地震研究所編, 1984: 新収日本地震史料, 第4巻. 日本電気協会, 東京, 870p.
- 都司嘉宣, 2011: 千年震災 繰り返す地震と津波の歴史に学ぶ. *ダイヤモンド社*, 東京, 276p.
- 都司嘉宣・小西達男, 1985: 日本海に発生した地震津波と数値計算結果. 国立防災科学技術センター研究報告, **35**, 277-297.
- 渡辺偉夫, 1998: 日本被害津波総覧 (第2版). 東京大学出版会, 東京, 238p.